

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	2
1.2	Problemstellung	3
1.2.1	Latenz	4
1.2.2	Datenrate	5
1.2.3	Paketverlust	6
1.3	Lösungsansatz	7
1.3.1	Latenzen	7
1.3.2	Datenraten	8
1.3.3	Paketverlust	8
1.4	Ergebnisse der Arbeit	8
1.4.1	Filtern von ungeeigneten Verbindungen	9
1.4.2	Reservierung für Datenströme	9
1.4.3	Realistische Modellierung und reale Netze	11
1.5	Verwandte Arbeiten	11
1.5.1	Alternative Ansätze	11
1.5.2	Ergänzende Verfahren	13
1.6	Aufbau der Arbeit	14
2	Grundlagen Wireless Mesh Networks	15
2.1	Einordnung und Abgrenzung	15
2.1.1	Wireless Multi-Hop Networks	15
2.1.2	Wireless Mesh Networks	15
2.1.3	Mobile Ad-Hoc Networks	16
2.1.4	Wireless Sensor Networks	17
2.1.5	Funkstandards	17
2.1.6	Routingprotokolle	17
2.2	Der Wireless LAN Standard IEEE 802.11	18
2.2.1	Medienzugriff nach DCF	19
2.2.2	Medienzugriff nach PCF	19
2.2.3	Der Carrier-Sense-Bereich	19
2.2.4	Hidden Station und RTS/CTS	20
2.3	Modellierung des Netzwerkverhaltens	21
2.3.1	Bitübertragungsschicht	21

Inhaltsverzeichnis

2.3.2	Anwendbarkeit existierender Propagationsmodelle	22
2.3.3	Modellierung asymmetrischer und schwacher Verbindungen	23
2.3.4	LLC-Schicht	24
2.3.5	Medienzugriffsschicht	25
2.4	Simulation	26
2.4.1	Der Netzwerksimulator NS-2	26
2.4.2	Realitätsnähe der Modellierung	26
2.5	Effekte in Wireless Mesh Networks	27
2.5.1	Selbstinterferenz	27
2.5.2	Blocked-Station-Problem	28
3	Mesh-Routing mit beschränktem Paketverlust	31
3.1	Routingprotokolle und ungeeignete Verbindungen	32
3.1.1	Probleme von OLSR	32
3.1.2	Routing mit Verlust-minimierenden Metriken	34
3.1.3	Probleme des Reverse-Path-Routings	35
3.1.4	Ergebnis der Betrachtung	36
3.2	Filtern ungeeigneter Verbindungen	37
3.2.1	Allgemeiner Ansatz	37
3.2.2	Identifizierung schwacher Verbindungen	38
3.2.3	Identifizierung symmetrischer Verbindungen	40
3.2.4	Evaluation der Filtermechanismen	41
3.2.5	Wechselwirkung mit realistischer Simulation	42
3.3	Design der Routingsoftware	43
3.3.1	Auswahl eines Routingverfahrens	43
3.3.2	Funktionsweise des Link-State-Routings	44
3.3.3	Schnittstellen des Link-State-Routings	45
3.4	Implementierung	46
3.4.1	Abstraktionsschicht GEA	47
3.4.2	Integration als virtuelles Layer-2-Netzwerk	49
3.4.3	Modularisierung der Software	51
3.5	Zusammenfassung	53
4	Cluster-basierte Ressourcenverwaltung	55
4.1	Grundlegende Idee	56
4.2	Anpassung und Erweiterung von RGCP	56
4.2.1	Zuverlässiger Multicast	57
4.2.2	Atomarer Multicast	57
4.2.3	Verwaltung der Gruppenzugehörigkeit	57
4.2.4	Zeitschranken	58
4.3	Clusterbildung	58
4.3.1	Clusterstruktur	58

4.3.2	Clustering-Protokoll	59
4.4	Scheduling des Medienzugriffs	60
4.4.1	Intraclusterscheduling	60
4.4.2	Interclusterscheduling	63
4.4.3	Sender im Carrier-Sense-Bereich	64
4.5	Eigenschaften des Intraclusterprotokolls	65
4.5.1	Zuverlässiger Multicast	65
4.5.2	Maximale Paketauslassung	66
4.5.3	Zeitschränken innerhalb eines Clusters	66
4.5.4	Prioritätsklassen	69
4.6	Propagation von Topologieinformationen	70
4.7	Forwarding durch Cluster	70
4.8	Pfadsuche für QoS-Verbindungen	71
4.8.1	Idee der optimistischen reaktiven Pfadsuche	72
4.8.2	Umsetzung der optimistischen reaktiven Pfadsuche	72
4.8.3	Beschränkung der Pfadlänge	75
4.8.4	Optimalitätsbetrachtung	77
4.8.5	Behandlung von Verbindungsabbrüchen	78
4.9	Prototypische Implementierung	79
4.9.1	Nutzung der DCF	79
4.9.2	Zeitschlitzlänge	79
4.10	Bewertung des Verfahrens	80
4.10.1	Zeitschränken	81
4.10.2	Garantien für Datenraten	81
4.10.3	Vergleich mit Best-Effort-Datenverkehr	82
4.11	Verwandte Arbeiten	83
4.11.1	Cluster-basierte Routing-Verfahren	83
4.11.2	Core Extraction Distributed Ad hoc Routing (CEDAR)	84
4.11.3	Clustering-based Channel Capacity Routing (CBCCR)	84
4.11.4	Chunnel Capacity-based Routing (CCBR)	85
4.11.5	Adaptive Cluster-based Routing (ACBR)	85
4.11.6	Pfadsuche	85
4.12	Zusammenfassung	87
5	Dezentrale Ressourcenverwaltung	89
5.1	Sendezzeit als teilbare Ressource	89
5.2	Lokaler Akzeptanztest	90
5.2.1	Summen-Akzeptanztest	91
5.2.2	Clique-Akzeptanztest	92
5.3	Existierende Ansätze	94
5.3.1	Ad-Hoc QoS On-Demand Routing	94
5.3.2	Beachtung der benachbarten freien Sendezzeiten	94

Inhaltsverzeichnis

5.3.3	Beachtung des Carrier-Sense-Bereichs	95
5.4	Probleme der existierenden Ansätze	96
5.4.1	Reservierungsfehler durch inkonsistente Werte	97
5.5	Maßnahmen zum Verhindern von Inkonsistenzen	98
5.5.1	Berücksichtigung der Selbstinterferenz	99
5.5.2	Reaktives Versenden von Updates	99
5.5.3	Fehlerwahrscheinlichkeit	100
5.6	Atomare Reservierungsoperationen	100
5.6.1	Basisprotokoll	100
5.6.2	Behandlung von Paketverlusten	101
5.6.3	Verhindern von Deadlocks	101
5.6.4	Behandlung von Topologieänderungen	102
5.6.5	Frühzeitige Erkennung von Ablehnungen	103
5.6.6	Verbessern der Akzeptanzrate	103
5.7	Bewertung des Verfahrens	105
5.8	Verwandte Arbeiten	105
5.8.1	Beobachtung des durchgeleiteten Datenverkehrs	105
5.8.2	Bestimmung der Belegt-Zeiten des Mediums	106
5.8.3	Anpassung des Carrier-Sense-Schwellwertes	106
5.8.4	Betrachtung der Sendeverzögerung	107
5.9	Zusammenfassung	108
6	Zentral koordinierte Ressourcenverwaltung	109
6.1	Architektur	110
6.1.1	Ablauf einer Reservierung	110
6.1.2	Behandlung von Topologieänderungen	111
6.1.3	Reservierung von gefluteten Datenströmen	111
6.2	Akzeptanztest mit gradueller Interferenz	112
6.2.1	Modellierung der gegenseitigen Interferenz	113
6.2.2	Akzeptanztest	113
6.2.3	Verifikation der Reservierung	114
6.3	Messung der Interferenz	114
6.3.1	Idee der Interferenzmessung	115
6.3.2	Messverfahren für Knotenpaare	116
6.3.3	Aufbau der Konfliktmatrix	117
6.3.4	Diskussion der Kapazitätssteigerung	118
6.3.5	Implementierung	121
6.4	Pfadsuche	123
6.4.1	Existierende Ansätze	123
6.4.2	Komplexitätsbetrachtung	124
6.4.3	Einfaches Shortest-Path-Routing	126
6.4.4	Gefiltertes Shortest-Path-Routing	126

6.4.5	Shortest-Path mit Selbstinterferenzschätzung	127
6.4.6	Vergleich der Pfadsucheverfahren	128
6.5	Anbindung an Anwendungssoftware	129
6.5.1	Schichtenübergreifende Integration mit RSVP	130
6.5.2	Anbindung über eine Publish/Subscribe-Middleware	132
6.6	Zusammenfassung	137
7	Zusammenfassung und Ausblick	139
7.1	Zusammenfassung	139
7.1.1	Ergebnisse der Arbeit	139
7.1.2	Vergleich der Reservierungsverfahren	141
7.2	Ausblick	142
Anhang		145
A	Propagationsmodelle	147
A.1	Decibel-Skala	147
A.2	Propagationsmodelle	147
A.2.1	Free-Space-Modell	147
A.2.2	Two-Ray-Ground-Reflection-Modell	148
A.2.3	Log-Normal-Shadowing-Modell	148
A.2.4	Ricean-Propagationsmodell	150
B	Messung in Routing mit Filterschicht	153
B.1	Szenario	153
B.2	Messverfahren	153
B.3	Ergebnisse	155
C	Ergänzungen zum Cluster-basierten Reservierungsverfahren	157
C.1	Propagation der Topologieinformationen	157
C.2	Beweis zur Terminierung der Pfadsuche	161
D	Evaluation dezentraler Reservierungsverfahren	165
D.1	Simulationsmodell	165
D.2	Parametrisierung der Topologiedichte	166
D.3	Fehlerwahrscheinlichkeit	167
D.4	Kosten pro Reservierung	168
D.5	Evaluation des verbesserten Akzeptanztests	169
E	Evaluation des zentralisierten Reservierungsverfahrens	171
E.1	Simulationsmodell	171

Inhaltsverzeichnis

E.1.1	Aufbau der Szenarien	171
E.1.2	Auswertung der Szenarien	172
E.2	Experimentelle Verifikation des Kalibrierungsverfahrens	174
E.2.1	Erkennung von Nicht-Beeinflussung	174
E.2.2	Erkennung von gegenseitiger Beeinflussung	176
E.3	Kapazitätssteigerung durch Kalibrierung	176
E.3.1	Aufbau der Szenarien	177
E.3.2	Auswertung der Szenarien	178
E.4	Evaluation der Pfadsuche	179
E.4.1	Donut-Topologien	179
E.4.2	Realistische Topologien	181
Literaturverzeichnis		185
Symbolverzeichnis		199
Tabellenverzeichnis		203
Abbildungsverzeichnis		205
Abkürzungsverzeichnis		209